

На правах рукописи

ФАТКУЛЛИН САЛАВАТ МИРДАСОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ИНДУКЦИОННОГО ПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА**

Специальности

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

и

05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2011

Работа выполнена в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Сарапулов Федор Никитич

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент
Фризен Василий Эдуардович

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Кувалдин Александр Борисович

кандидат технических наук, доцент
Бородацкий Евгений Георгиевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Пермский государственный
национальный технический университет»,
г. Пермь

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Защита диссертации состоится 30 ноября 2011 года в 14.15 на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 при Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. Э406

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ, К-2, ученому секретарю совета.

Автореферат разослан 28 октября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.285.03
д.т.н.

Зюзев А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный подход к использованию индукционной тигельной печи (ИТП) как высокоэффективного и экономичного плавильного агрегата предполагает управление тепловым и электродинамическим воздействием на расплавляемый металл на всех стадиях плавки. Целью этого подхода являются снижение времени плавки и улучшение качества получаемого металла, что имеет большое значение в литейном производстве, где плавильные агрегаты на основе ИТП зарекомендовали себя наилучшим образом. Использование электродинамического воздействия на жидкий металл позволяет создать новый агрегат с расширенными функциональными возможностями, который разрабатывается коллективом кафедры «Электротехники и электротехнологических систем» (ЭЭТС) совместно с автором работы. Такой агрегат получил название многофункциональный плавильный агрегат (МПА). Основу многофункционального плавильного агрегата образует ИТП. Конструктивной особенностью печи в данном случае является то, что высота и внутренний радиус тигля соизмеримы по величине (как известно, в типовой конструкции ИТП высота тигля много больше его внутреннего диаметра). Такое соотношение размеров во многом связано с особенностями технологических операций, поэтому ряд требований, которые предъявляются к классической ИТП, неприемлем для МПА. В частности, при восстановлении оксидов методом жидкофазного восстановления на вращающейся жидкометаллической подложке выделяется избыточная тепловая энергия за счет экзотермических реакций. Функция нагрева загрузки становится вторичной, преобладающей становится функция обеспечения вращения расплава с необходимой угловой скоростью, обеспечивающей создание параболической лунки достаточной глубины. Лунка образует своеобразный «сосуд» для восстанавливаемых оксидов и шлака. Эту функцию выполняет индуктор электромагнитного вращателя (ЭМВ) с вращающимся магнитным полем.

Если индуктор ИТП питается от инвертора средней частоты, то индуктор ЭМВ питается от преобразователя регулируемой (от средней до низкой) частоты в зависимости от этапа технологического цикла. Если к тому же учесть, что индукторы и система охлаждения МПА должны отводить избыточное тепло на основной технологической операции, то необходимо рассмотрение работы агрегата как многокомпонентного электротехнического комплекса, в который входят индукторы ИТП и ЭМВ, источники их питания, системы компенсации реактивной мощности, система охлаждения, система контроля и управления режимами работы.

Объектом исследования является многофункциональный плавильный агрегат как многокомпонентный электротехнический комплекс, состоящий из индукционной тигельной печи, электромагнитного вращателя, источников питания, системы компенсации реактивной мощности, системы охлаждения, системы дозирования и загрузки, системы контроля и управления режимами.

Предмет исследования: режимы работы многофункционального плавильного агрегата.

Цель работы: выработка рекомендаций по формированию энергоэффективных режимов работы агрегата на всех этапах технологического процесса, а также рекомендации по его проектированию.

Решаемые задачи:

1. Построение и разработка достаточно простой, легко реализуемой и корректной математической модели, которая может использоваться для проектирования, а также анализа электромагнитных и тепловых процессов в рабочем режиме ИТП.
2. Создание компьютерной модели МПА, предлагаемого коллективом кафедры ЭЭТС совместно с автором работы.
3. Исследование режимов работы МПА с помощью созданной модели.
4. Создание экспериментальной установки и сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.
5. Формулировка рекомендаций по формированию энергоэффективных режимов работы плавильного агрегата.
6. Формулировка рекомендаций к основным техническим решениям для создания опытно-промышленного образца многофункционального плавильного агрегата.

Методы исследования. В работе используются методы теории электрических цепей, метод эквивалентных тепловых схем замещения, методы конечных разностей и конечных элементов. Основной ряд задач реализован в пакете MATLAB, позволяющем провести расчет всех параметров в одном формуляре. Используются методы компьютерного моделирования с помощью пакета Elcut, предназначенного для анализа полевых задач. Также используются физические методы исследования с применением лабораторных установок.

Научную новизну представляют математическая и компьютерная модели оригинального МПА, позволяющие в комплексе рассмотреть вопрос управления плавильным агрегатом в различных режимах его работы, результаты анализа указанных режимов, а также рекомендации по их практическому формированию.

Практическая ценность заключается в создании комплекса программных средств для математического моделирования электромагнитных и тепловых процессов многофункционального плавильного агрегата, экспериментального стенда для исследования режимов работы лабораторной модели МПА, а также практических рекомендаций по формированию энергоэффективных режимов его работы.

Реализация

1. Результаты исследования электромагнитных и тепловых процессов в современных плавильных агрегатах для разработки и проектирования современных энергоэффективных индукционных печей переданы ЗАО «РЭЛТЕК» (г. Екатеринбург).

2. Результаты работы используются на кафедре электротехники и электротехнологических систем УрФУ в учебном процессе, при курсовом и дипломном проектировании, проведении научных исследований и лаборатор-

ных работ.

3. Диссертационная работа подготовлена в рамках целевой программы министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010)» «Разработка, технологическое и электрофизическое обоснование процессов получения высоколегированных сплавов (в том числе с упрочняющей нанокристаллической структурой) при интенсификации перемешивания в агрегате с вращением шлака и металла».

Апробация. Основные результаты доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных мероприятиях:

- Международная научно-техническая конференция «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах». Севастополь, 2007.
- III Международная НТК «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы». Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007.
- VII научно-практическая конференция «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург: ЗАО «Уральские выставки-2000», 2007.
- THE 3rd INTERNATIONAL FORUM ON STRATEGIC TECHNOLOGIES, IFOST – 2008. Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia) - Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia). June 23-29, 2008.
- XII Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты - МКЭЭ - 2008». Крым, Алушта, 2008.
- VIII научно-практическая конференция с международным участием «Проблемы и достижения в промышленной энергетике», Екатеринбург, 2008.
- Российско-британский семинар молодых ученых и студентов «ЭКОТЕХНОЛОГИИ 21 ВЕКА: ЭКОТЕХ – XXI» Проект Британского Совета. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2007.
- VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna / Innowacyjne Materiały i Technologie w Elektrotechnice - i-MITEL 2010, Przylesko k. Gorzowa Wielkopolskiego, 2010.
- II Всероссийская конференция «ИННОВАЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА», НГТУ, 2010.
- II Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий – АПЭЭТ-11», Екатеринбург, 2011.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 16 печатных работ, в том числе 3 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, 5 приложений. Общий объем 217 страниц. Основная часть изложена на 164 страницах ма-

шинописного текста, иллюстрирована 87 рисунками, 8 таблицами. Список использованной литературы содержит 101 наименование.

Соответствие темы исследования паспорту специальности Соответствие паспорту специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»:

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем;
2. Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем;
3. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Соответствие паспорту специальности 05.09.10 «Электротехнология»:

1. Разработка новых технологических процессов для получения чистых металлов, сплавов с заданными физическими и химическими свойствами, в том числе для нужд полупроводниковой промышленности.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность создания компьютерной модели нового устройства МПА и необходимость исследования его режимов работы, сформулированы цели работы и задачи, необходимые для их достижения, отмечены научная новизна, практическая ценность результатов исследования и результаты внедрений, приведены структура диссертации и апробация работы.

В первой главе проведен обзор литературных источников современных ИТП. Основным направлением в развитии современных тигельных печей, кроме основного их назначения расплавления металла, становится электро-механическое воздействие на жидкую фазу металла. Отмечено, что одним из решений в современном использовании перемешивания металла является создание МПА на основе ИТП, в котором присутствуют два индуктора – один нагревающий, второй – создающий электродинамическое воздействие на жидкий металл, раскручивающее его. Появляются новые качественные возможности для проведения различных технологических реакций, которые дадут возможность расплавлять в таком агрегате не только металлическую шихту, но и шихту, содержащую в своем составе оксиды.

Описаны математические модели электромагнитного расчета ИТП: на основе метода Т-образных схем замещения, на основе детализированных схем замещения и конечно-элементные. Отмечены достоинства и недостатки каждой из представленных моделей.

Описан метод теплового расчета ИТП на основе тепловых схем замещения, который позволяет составить корректную и достаточно простую тепловую модель. Произведено исследование влияния разбиения расчетной области методом контрольного объема, с расположением расчетной точки, в первом случае, на границе между контрольными объемами (половинчатые контрольные объемы) и, во втором случае, в середине контрольного объема, на погрешности вычислений, а также определена точность полученных результатов при разной степени ее детализации. Целью исследования являлось определение наиболее точного метода определения температур на границах слоев при построении динамической тепловой модели ИТП. В результате исследования сделаны выводы: использование разбиения методом половинчатых контрольных объемов для поставленной выше задачи является более точным; при более подробном разбиении точность результатов увеличивается, однако при работе устройства в установившемся режиме, погрешность в расчете не превышает 7%, поэтому нет необходимости увеличивать степень детализации футеровки более, чем на 2 слоя.

Во второй главе предлагается описание математической модели ИТП.

Одномерная динамическая модель ИТП, построенная методом эквивалентных тепловых схем замещения, с достаточной степенью детализации позволяет получить представление о температурах элементов конструкций ИТП, тепловые процессы, происходящие в загрузке, представлены интегрально.

В качестве «точного» метода разбиения выбран метод половинчатых контрольных объемов.

Количество слоев, на которые разбита стенка тигля и его подина, выбрана равной двум, так как большая часть работы футеровки печи протекает в установившемся тепловом режиме. В качестве электромагнитной модели ИТП используется метод схем замещения: для однофазного питания достаточно рассчитать параметры по Т-образной модели, при питании индуктора по более сложным схемам необходимо

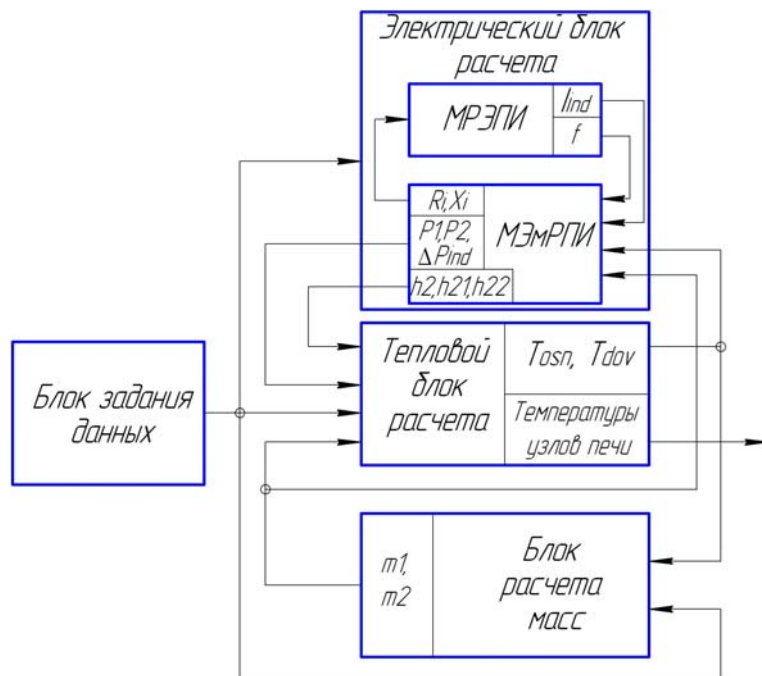


Рис. 1. Общая структура модели

можно использовать модель на основе детализированных схем замещения.

Модель создана в пакете MATLAB 7.0.1/SIMULINK. Она содержит 4 основных блока, которые являются взаимосвязанными: блок задания данных, блок расчета масс, электрический блок расчета и блок теплового расчета

(рис. 1). На рис.1: МРЭПИ – модуль расчета электрических параметров инвертора; МЭМРПИ – модуль электромагнитного расчета параметров индуктора; I_{ind} – ток индуктора; f – частота тока на выходе инвертора; R_i и X_i – активное и реактивное сопротивления индуктора; P_1 и P_2 – мощности, передаваемые индуктором в основную нагрузку и довалку; ΔP_{ind} – мощность потерь индуктора; h_2 , h_{21} , h_{22} – уровни основного металла и довалки; m_1 и m_2 – массы основного металла и дополнительной загрузки металла.

Задача управления печью состоит в поддержании максимальной мощности в период расплавления и заданной температуры металла в период выдержки перед разливкой. Время выдержки зависит от технологии разливки.

Для поддержания максимальной по возможности мощности необходимо регулировать напряжение индуктора при постоянном напряжении источника питания.

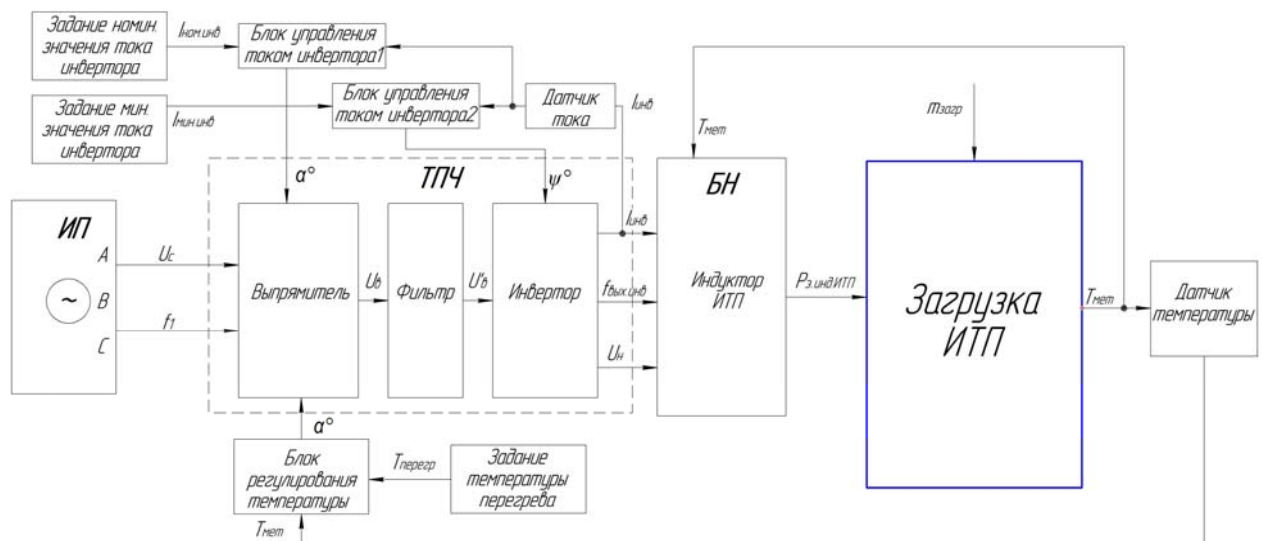


Рис. 2 Функциональная схема ИТП

Управляемым объектом системы является ИТП. Управляемым параметром является температура металла (загрузки). Управляющим воздействием является: электромагнитная мощность индуцируемых токов от индуктора. Возмущающим воздействием является масса металла в печи.

Блок теплового расчета реализован в рамках тепловых детализированных схем, построенных в программе SIMULINK и представленных в виде пространства состояний. Система уравнений является нелинейной, от температуры зависят теплоемкости материалов, коэффициенты теплопроводности.

Поскольку загрузка печи в различные моменты времени находится как в твердом, так и в жидком состоянии, при создании модели был учтен фазовый переход агрегатного состояния вещества разбиением процесса плавки во времени на участки, каждому из которых соответствует своя расчетная модель.

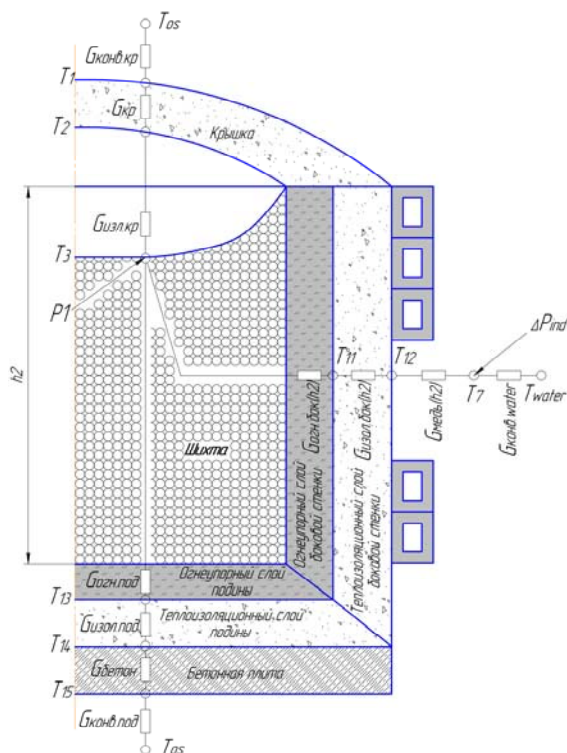


Рис. 3. Тепловая схема замещения печи на первом этапе

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ T7 \\ T11 \\ T12 \\ T13 \\ T14 \\ T15 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G'_{собр1} & G'_{кр} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G'_{кр} & -G'_{собр2} & G'_{изл.кр} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G'_{изл.кр} & -G'_{собр3} & 0 & G'_{о.бок} & 0 & G'_{о.под} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -G'_{собр7} & G'_{м} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G'_{о.бок} & 0 & -G'_{собр11} & G'_{т.бок} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G'_{м} & 0 & -G'_{собр12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G'_{о.под} & 0 & 0 & 0 & -G'_{собр13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G'_{тл.под} & -G'_{собр14} & G'_{б} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G'_{б} & -G'_{собр15} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ T7 \\ T11 \\ T12 \\ T13 \\ T14 \\ T15 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & G'_{к.кр} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & G'_{к.в} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G'_{к.под} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P1 \\ P2 \\ \Delta P_{ind} \\ Tw \\ Tos \end{bmatrix}$$

Рис. 4 Матричная система уравнений пространства состояний соответствующая тепловой модели на первом этапе плавки

На третьем этапе плавки изначально загруженный металл находится в расплавленном состоянии, происходит завалка новой порции шихты. Выделение мощности теперь происходит не только в узле ТЗ, но и в Т101 или Т31 (мощность Р2, получаемая в электрическом блоке расчета). После расплавления загруженной шихты происходит следующая завалка шихты, пока не будет отработано заданное количество довалок. В модели предусмотрено два варианта довалки: когда шихта перекрывает весь уровень расплава и когда не перекрывает.

Электрический блок расчета состоит из 2 основных модулей: блок расчета параметров инвертора и электромагнитного расчета параметров индуктора индукционной тигельной печи.

На первом этапе плавки (рис 3 и соответствующая ей пространство состояний на рис. 4) в тигель загружается шихта с определенной массой. Мощность индуцированных токов Р1, вычисляемая в электрическом блоке расчета, подводится к узлу ТЗ, в котором сосредоточена указанная тепловая масса шихты. Происходит ее нагрев и расплавление. Второй этап плавки обусловлен проседанием шихты при переходе загрузки из твердого в жидкое агрегатное состояние.

При расплавлении металла образуется вторая тепловая ветвь (Т4, Т5, Т6), обусловленная проседанием уровня металла при расплавлении. Вышеупомянутая вторая ветвь также может образоваться, если уровень изначально загруженного металла меньше, чем высота тигля.

В качестве источника питания для ИТП выбран автономный параллельный инвертор тока. Для теплового расчета шаг интегрирования по времени имеет порядок от нескольких секунд до нескольких десятков секунд, для расчета же режима работы силовых ключей инвертора шаг времени интегрирования должен быть порядка единиц миллисекунд. Так как для всей модели выбирается единый шаг интегрирования по времени, это может привести к ничем не оправданному увеличению продолжительности расчетов. Поэтому наиболее рациональной в данном случае представляется реализация полной модели с использованием статической модели инвертора, которая позволяет получить интегральные параметры режимов его работы без детального исследования работы силовых ключей. Необходимыми и достаточными для описания работы инвертора и включения его в общую модель являются следующие параметры – действующее значение тока инвертора и частота тока.

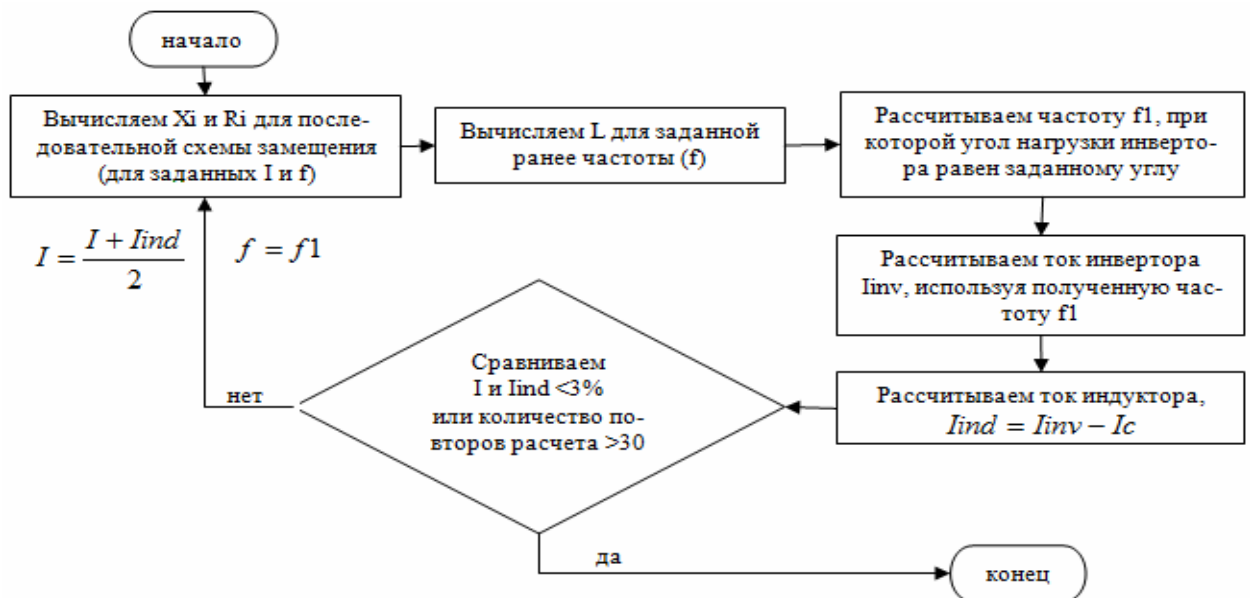


Рис. 5. Алгоритм расчета токов и частоты инвертора и индуктора

Инвертор, а также управление им реализованы посредством m-файла, в котором описываются основные расчетные уравнения. На рис. 5 приведен алгоритм расчета электрических параметров инвертора.

Для поддержания заданной температуры металла в печи необходимо придерживаться следующих предельных параметров: номинального тока инвертора ($I_{ном}$) во время расплавления металла и минимального тока выпрямителя ($I_{мин}$). При превышении номинального тока возможен выход из строя инвертора вследствие перегрева силовых ключей, при снижении тока выпрямителя ниже определенного уровня инвертор также прекращает работать. Алгоритм работы системы управления инвертором представлен на рис. 6.

Электромагнитный расчет параметров индуктора реализован посредством m-файла, созданного в соответствии с классической методикой расчета параметров ИТП по Т-образной схеме замещения. В этом расчете учитываются: изменение уровня загрузки; изменение удельного электрического со-

противления загрузки в зависимости от ее температуры; зависимость магнитной проницаемости магнитной шихты в зависимости от напряженности магнитного поля, создаваемого индуктором; шихтовая загрузка и сплошная; изменение электрической схемы замещения при выполнении довалки.

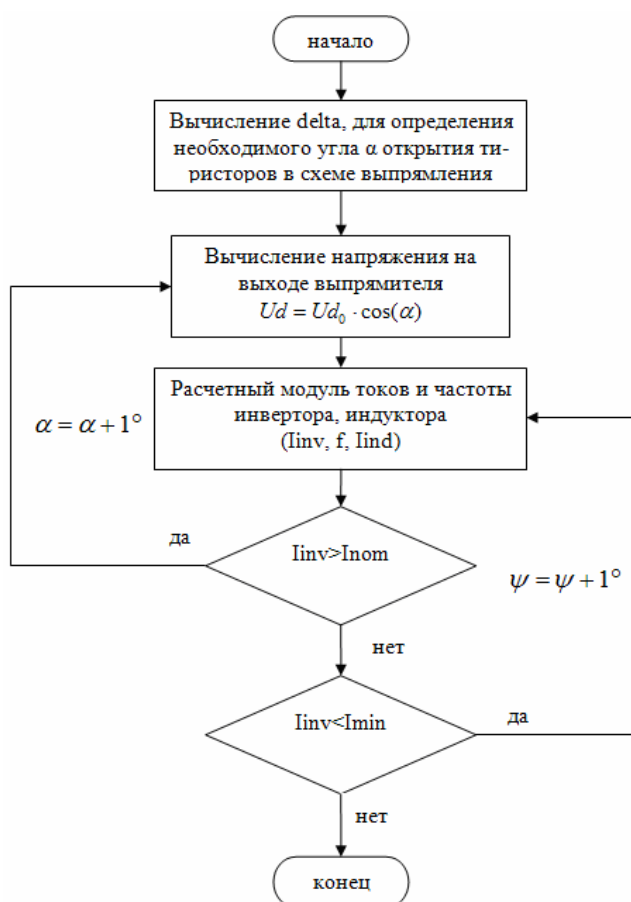


Рис. 6. Алгоритм работы системы управления инвертором

Выполнена верификация электромагнитных моделей для сплошной и шихтовой загрузки. Для сплошной загрузки использовались модели, построенные на основе Т-образной схемы замещения, на основе детализированной магнитной схемы замещения (ДМСЗ) и конечно-элементная модель, представленная коммерческим пакетом Elcut. Для шихтовой загрузки использовались модели, построенные на основе Т-образной схемы замещения и ДМСЗ. В результате проведенных исследований был сделан вывод о возможности использования любой из моделей для получения адекватных результатов с точностью, достаточной для инженерной практики.

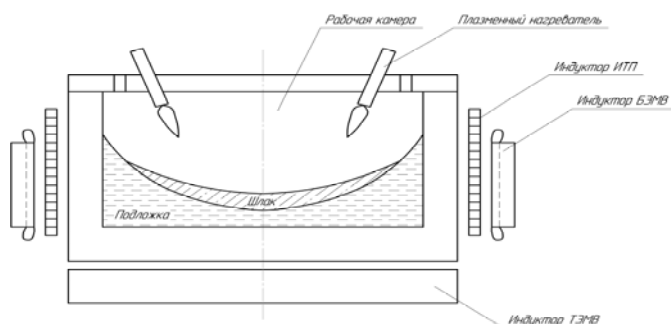


Рис. 7. Общий вид МПА

В третьей главе представлена конструкция впервые создаваемого МПА, предлагаемого коллективом кафедры ЭЭС совместно с автором работы, описаны режимы его работы, а также разработана его компьютерная модель.

В качестве иллюстрации представим процесс переработки в МПА оксидосодержащей шихты. На первом этапе с помощью нагревательного индуктора создается подложка из металла (например, из ферросиликотитана или из чистого железа). С помощью ЭМВ в жидком металле образуется лунка. Следующий этап - расплавление оксидосодержащей шихты в лунке параболической формы энергией, передаваемой от нагревательного индуктора МПА через металлический вращающийся расплав. Далее наступает этап восстановления оксидов из шлакового расплава, который может наступить сразу, если это металлический расплав чугуна. Углерод чугуна восстанавливает оксиды металлов из шлака, при этом требуется дополнительный расход энергии от нагревательного индуктора МПА, частично дополнительная энергия на разогрев расплава поступает от ЭМВ во время вращения ванны расплава.

Общий вид многофункционального плавильного агрегата представлен на рис.7 и состоит из следующих элементов: рабочая камера, индуктор ИТП, индуктор торцевого ЭМВ, индуктор бокового ЭМВ, плазменный нагреватель.

Исходя из общей конструкции МПА, можно выделить следующие режимы работы, используя диаграмму мощностей МПА:

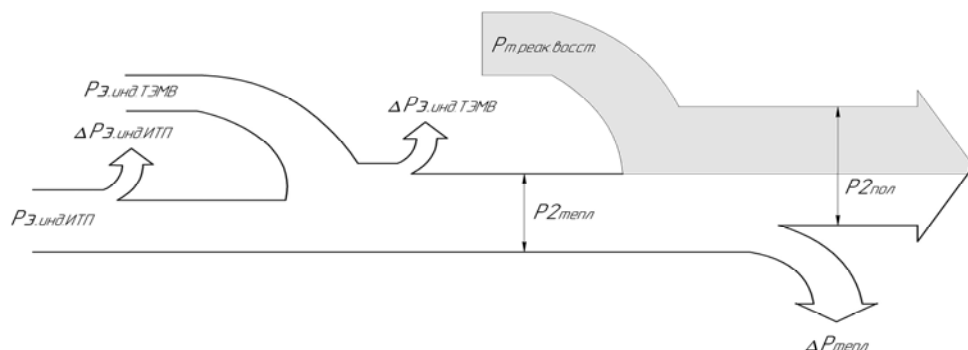


Рис. 8. Энергетическая диаграмма режимов МПА

1. Режим подготовки подложки (рис.8 – без учета закрашенной части ветви):

$$P_{2пол} < P_{2тепл}.$$

Данный режим работы обусловлен необходимостью создания расплавленной подложки. Суммарная подводимая мощность к подложке равна сумме электрической мощности от нагревательной части минус электрические потери на индукторе и электрической мощности включенного торцевого ЭМВ минус электрические потери на индукторе:

$$P_{2тепл} = P_{э.инд.ИТП} + P_{э.инд.ТЭМВ} - \Delta P_{э.инд.ИТП} - \Delta P_{э.инд.ТЭМВ}.$$

Полезная мощность, переданная в подложку, идущая на ее нагрев равна разности между тепловой мощностью и потери через стенки ванны:

$$P_{2пол} = P_{2тепл} - \Delta P_{тепл}.$$

2. Режим восстановительных реакций – технологический (рис.8 – с учетом закрашенной ветви):

$$P_{2пол} > P_{2тепл}.$$

В данном режиме работы тепловая мощность, подводимая для нагрева подложки меньше полезной мощности, за счет реакций жидкофазного восстановления:

$$P_{2пол} = P_{2тепл} + P_{т.реак.восст} - \Delta P_{тепл}.$$

При этом необходимо обеспечить достаточный отвод тепла, так как несоблюдение данного условия может перегреть металл и вызвать разрушение футеровки (тигля). Для этого в конструкции предусмотрены водоохлаждаемая крышка и усиленный теплоотвод индуктора ИТП. Кроме того, для увеличения плотности тока в индукторе торцевого ЭМВ, а так же для улучшения теплоотвода от пода рабочей камеры, было бы перспективно выполнить обмотку индуктора ТЭМВ из профилированной водоохлаждаемой трубки.

На рис. 9 изображен один из возможных вариантов исполнения вращателя в составе МПА. Там же показано расположение греющего индуктора и трубчатой системы охлаждения стенок тигля. Основное назначение труб –

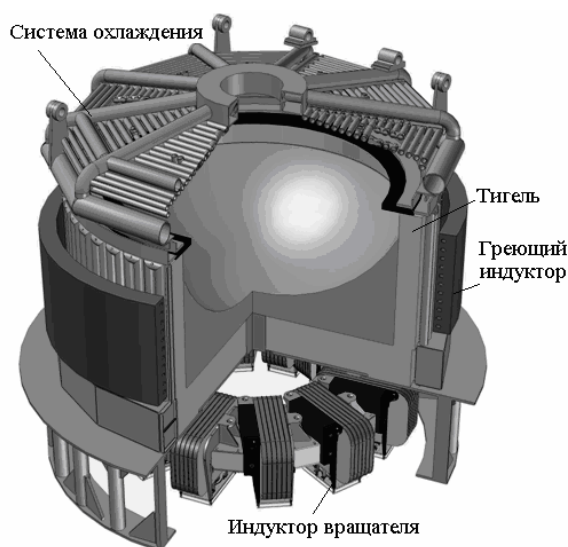


Рис. 9. МПА с торцевым ЭМВ

отвод избыточного тепла, образуемого в ходе экзотермических реакций жидкофазного восстановления. Электрооборудование МПА включает в себя также источники питания, предназначенные для питания ЭМВ на пониженной частоте и греющего индуктора ИТП на повышенной. Для управления работой МПА на всех этапах возможно использование следующих каналов воздействия: ток и частота тока индуктора ИТП; схема включения индуктора ИТП; ток и частота тока индуктора ЭМВ; довалки шихты при наплавлении подложки; подача в рабочую камеру реагента (шлака). В процессе

создания подложки и во время установившегося режима работы МПА постоянно изменяется уровень металла, что приводит к изменению электрического режима работы печи. Таким образом, для анализа работы МПА необходимо создание модели, которая способна учитывать вышеназванные особенности работы ИТП, как составной части МПА, а также особенности работы источника питания – статического преобразователя частоты.

Математическая модель МПА на основе ИТП создана на базе одномерной динамической модели ИТП в пакете MATLAB 7.0.1/ SIMULINK и поэтому в дальнейшем речь пойдет об ее отличительных особенностях. Модель также включает в себя четыре блока: блок задания данных, блок расчета масс, тепловой блок расчета и блок расчета электрических параметров

Блок расчета масс необходим на первом этапе для получения необходимого уровня подложки в тигле, а также для расчета масс реагента и шлака на втором этапе работы агрегата, в ходе реакций восстановления. Отличительной особенностью работы МПА по сравнению с ИТП на первом этапе является то, что нет необходимости заполнять весь тигель расплавленным металлом, так как в дальнейшем включается электромагнитный вращатель (ЭМВ) и уровень металла у пристеночной области увеличивается, поэтому уровень наплавляемого металла обычно не превышает трети высоты тигля.

В модели расчет второго этапа реализован следующим образом: после запуска вращателя в агрегат сначала загружается определенная масса восстановителя, которая нагревается до температуры подложки и растворяется в нем. Далее загружается и нагревается до заданной температуры часть массы реагента. После нагрева до реакционной температуры начинается реакция восстановления с выделением шлака и металла при постоянной досыпке реагента, реализованной в модели посредством интегратора, использующего значения скорости реакций выделения и подачи. Управление процессами реакций организовано посредством matlab-функции, где задаются и вычисляются необходимые коэффициенты реакции, а также мощности, которые выделяются в ходе реакций восстановления. Вследствие наличия вращателя в моделируемой установке, при включении которого изменяется геометрия загрузки, в блок расчета масс был интегрирован модуль *вычисления геометрии лунки*. Вычисление геометрии необходимо для определения тепловых проводимостей между тепловыми массами подложки, шлака и реагента. Для его реализации использовалась matlab-функция. В качестве геометрии формы лунки для расчетов был выбран “эквивалентный” конус по объему лунки.

Тепловой блок расчета. Как было уже упомянуто выше, МПА на этапе создания подложки представляет собой ИТП со всеми особенностями его работы. После наплавления необходимого уровня подложки происходит запуск ЭМВ. Происходит раскручивание металлической подложки, которая меняет свои геометрические параметры, образуя лунку. При достижении необходимой скорости вращения металлической подложки происходит изначальная засыпка реагента.

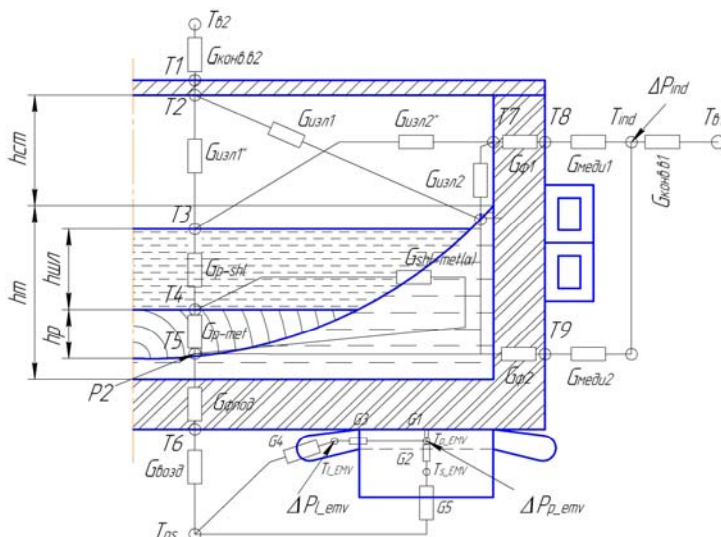


Рис. 10. Тепловая модель МПА на втором этапе. Масса реагента и шлака находятся в лунке, образовавшейся при вращении металла

Система уравнений, описывающая тепловые процессы в МПА для начала плавки (на этапе подготовки подложки), аналогична (2) с учетом изменения структуры модели рис. 10.

Тепловые массы реагента и шлака (рис.10): 3 – половина массы шлака, 4 – половина массы шлака + половина массы реагента, 5 – половина массы реагента + масса подложки.

Мощность, выделяемая в подложке (рис.10):

$$P2 = Pm1 + P_{emv} + P_{reac}, \quad (3)$$

где $Pm1$ – мощность, передаваемая в загрузку от ИТП в составе МПА;

P_{emv} – мощность, передаваемая в загрузку от вращателя;

P_{reac} – мощность, выделяемая в подложке от реакции восстановления.

Электрический блок расчета. Для расчетов электромагнитных параметров загрузки на этапе наплавления металлической подложки была взята математическая модель на основе Т-образных схем замещения. Модуль электромагнитного расчета вращателя МПА построен на методе ДМСЗ и включает электромагнитный и гидродинамический расчет ЭМВ. Одним из важнейших энергетических параметров работы ЭМВ является мощность, выделяемая во вторичном элементе и потери в обмотке ЭМВ. Реализован данный модуль посредством *matlab*-файла.

Второй этап работы МПА, названный этапом жидкофазного восстановления, представляет большой интерес для изучения. Задачей управления на данном этапе является: создание лунки необходимой глубины, поддержание ее на необходимом уровне при различных возмущениях (изменение электропроводности и массы подложки), поддержание температуры подложки не выше заданного значения.

Для управления агрегатом (рис.12) на данном этапе возможно использовать следующие воздействия: тепловую мощность реакции восстановления, которую можно описать функцией загружаемой массы реагента; напряжение на обмотке индуктора и частота тока индуктора, которые влияют на мощность, передаваемую в подложку, и как следствие на скорость вращения, которая определяет уровень подложки у пристеночной области и соответственно площадь контакта реагента с подложкой и выделяемую мощность.

Разработана система управления “скоростью” подачи реагента в рабочую камеру (рис.11), регулирование осуществляется по температуре подложки, определяемую напрямую с помощью пирометра, либо через косвенные параметры, получаемые через систему охлаждения, измеряя температуру воды на входе и выходе, и ее расход. Задается значение температуры подложки, чтобы предотвратить разрушение футеровки вследствие превышения ее максимально допустимой температуры, которую может выдержать футеровка при вращении жидкого металла.

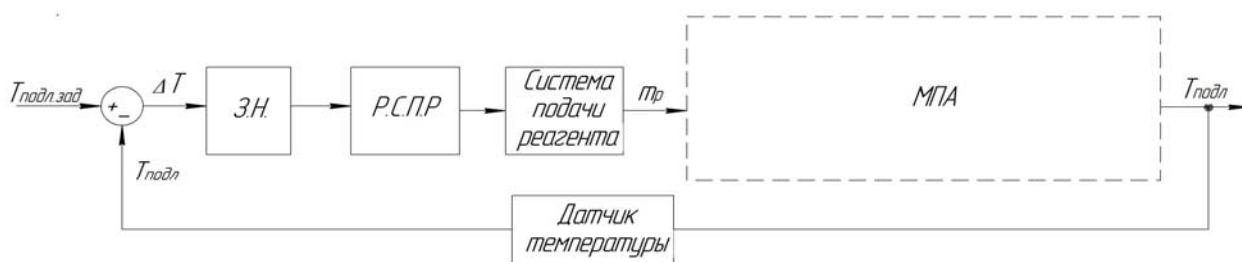


Рис. 11. Функциональная схема управления подачей реагента в ванну агрегата (ЗН – зона нечувствительности, РСРР – регулятор “скорости” подачи реагента)

Разработана система управления ЭМВ (рис.13), которая позволяет получить требуемую высоту лунки, задание которой происходит посредством вычислительного блока расчета геометрии лунки. Высота лунки представляется в виде зависимости от массы металла, удельной электропроводности и частоты тока индуктора (влияющую на механическую мощность в подложке): $h_l = f(m_{подл}, \rho_{подл}, f_u)$. В качестве регуляторов используются типовые звенья.

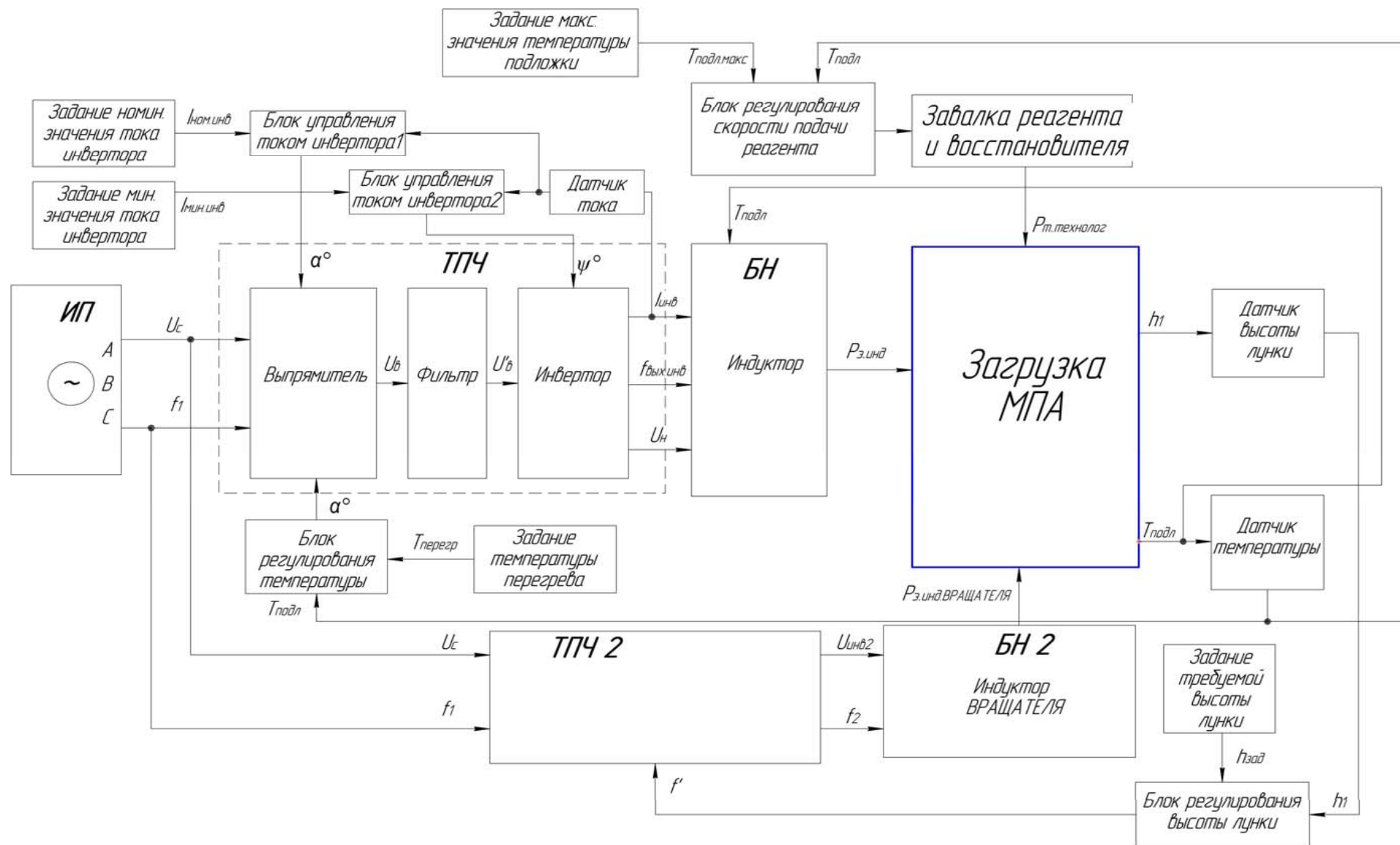


Рис.12. Функциональная схема МПА

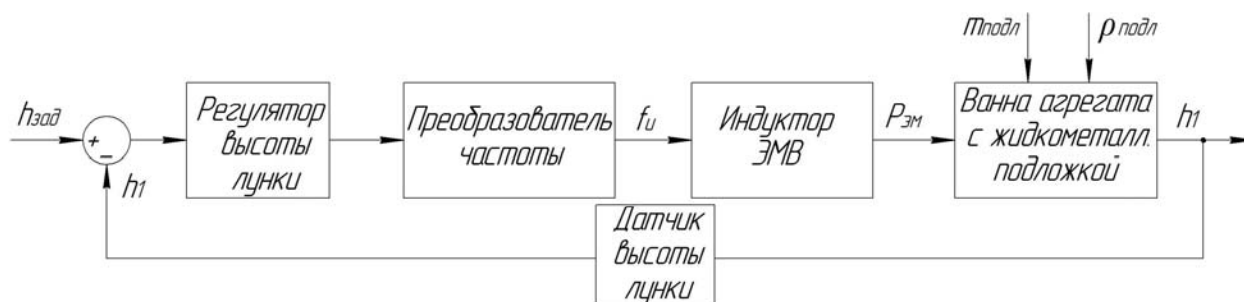


Рис. 13. Функциональная схема управления ЭМВ

Проведено сравнение работы созданной статической модели инвертора с его динамическим аналогом, созданным в пакете MATLAB/Simulink библиотекой SimPowerSystems. При этом сравнивались следующие параметры: ток инвертора, выходное напряжение инвертора, ток индуктора и частота тока на индукторе при полученном угле выпрямителя в статической модели. Результаты расчета приведены на рис.14 (1 – по статической модели, 2 – по динамической). Был сделан вывод, что созданная компьютерная статическая модель инвертора пригодна для использования.

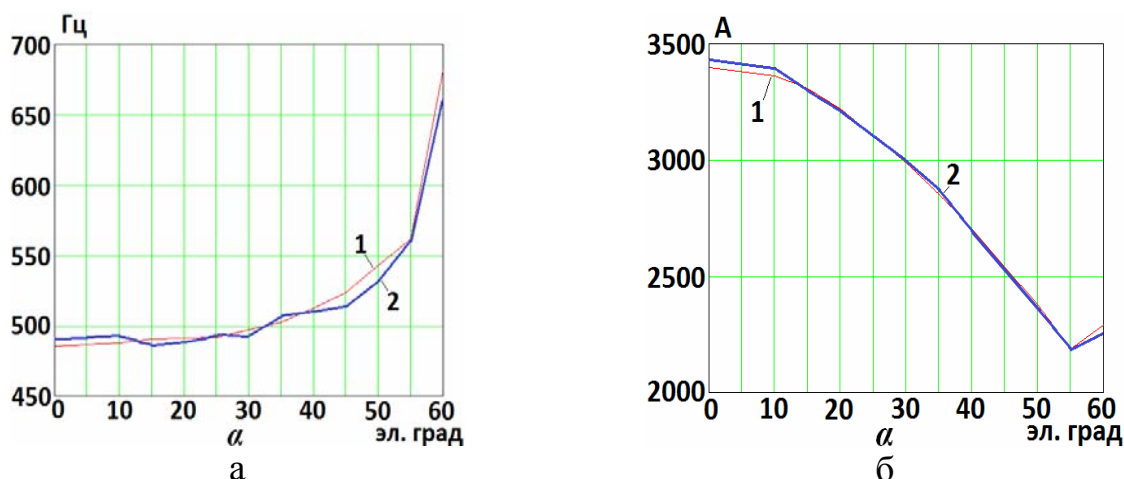


Рис. 14. Зависимости частоты (а) и действующего значения (б) тока индуктора

В четвертой главе представлены результаты исследований характеристик МПА в рабочих режимах, а также выработанные рекомендации.

Определено влияние размеров шихты на скорость расплавления загрузки в начальный период плавки. Для исследования использовалась созданная модель индукционной тигельной печи. Расплавляемый металл – сталь, температура плавления 1400 °С. В качестве номинальной частоты преобразователя выбрана частота 500 Гц. Количество витков индуктора равно 12. Исходная масса загрузки 800 кг. Номинальная мощность преобразователя – 1,6 МВт.

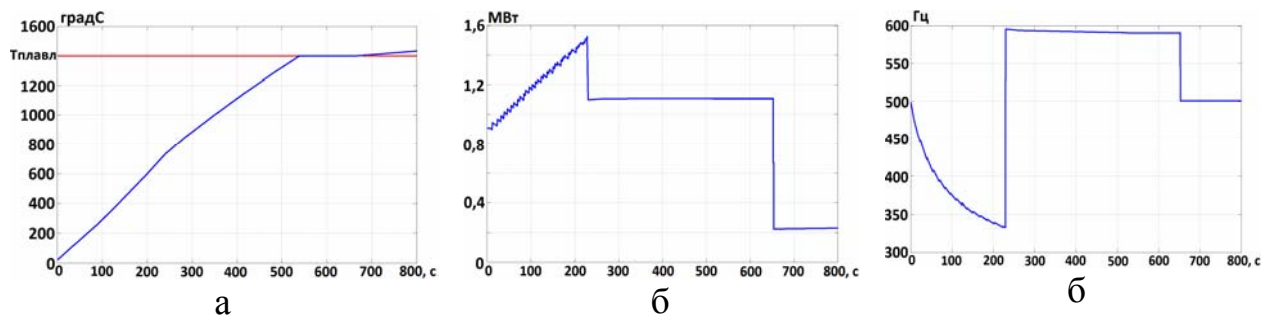


Рис. 15. Зависимости от времени температуры металла (а), мощности источника питания (б) и частоты тока (с)

Сделан вывод, что завалка шихты средним диаметром от 0,04 до 0,1 м, при плавке стали на номинальной частоте преобразователя 500 Гц, является наиболее выгодной как по скорости расплавления, так и по расходу электроэнергии. Минимальное время, потраченное на расплавление 800 кг стальной шихты составило 667 с при среднем диаметре шихты, равном 0.07 м, а расход электроэнергии 259 кВт*ч. При использовании шихты вне указанного диапазона размеров время расплавления кусковой загрузки увеличивается, а, следовательно, увеличивается и расход электроэнергии. На рис.15 приведены результаты расчета при среднем диаметре шихты 0,07 м.

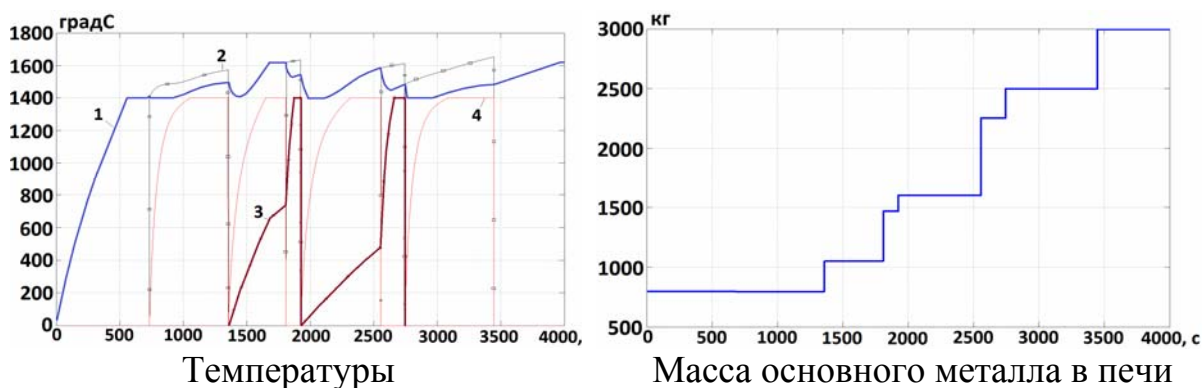


Рис. 16. Результаты расчета параметров расплавления загрузки при 4 довалках по 250, 550, 900 и 500 кг. 1 – основного металла, 2 – расплавленного металла выше основного металла с довалкой, 3 – довалки в жидком расплаве, 4 – довалки, оставшейся выше основного металла

Исследовано влияние пропорций довалок на процесс и скорость их расплавления. Для исследования использовалась созданная модель индукционной тигельной печи. Расплавляемый металл – сталь. Изначальная масса завалки равна 800 кг. Средний диаметр загружаемой шихты 0.1 м. На рис.16 представлены некоторые результаты проведенного исследования.

По результатам проведенного исследования сделаны следующие выводы: выполнение довалок равными порциями приводят к затягиванию процесса плавки; при первой довалке, перекрывающей объем жидкого металла в печи, возможно затвердевание жидкой фазы при малом ее уровне; наиболее

благоприятным вариантом загрузки порций шихты является загрузка довалок со второй с перекрытием уровня расплавленного металла.

Проведено исследование наилучших соотношений высоты и диаметра индуктора для оценки КПД и коэффициента мощности при половинной загрузке ванны печи для дальнейшего включения вращающего индуктора и получения лунки. В качестве базовых размеров агрегата, были приняты следующие: высота индуктора и ванны печи 1 м; внутренний диаметр индуктора 2,5 м; толщина стенки ванны принималась равной 0,25 м, расстояние от внутреннего диаметра индуктора до “внутреннего диаметра” магнитопровода – 0,05 м. Расчет производился на основе Т-образной схемы замещения индуктора.

Наилучшее соотношение высоты индуктора к диаметру индуктора при оценке КПД является 1,4 – 1,5 (выделено в табл. 1). Стоит отметить, что при увеличении частоты растет КПД, тогда как коэффициент мощности – уменьшается. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее проведенными исследованиями этой задачи. Данные проведенного исследования использованы при проектировании нагревательной части МПА.

Результаты исследования при постоянстве объема индуктора и металла в печи

Таблица 1

h_1/D_1	h_1 , м	D_1 , м	50 Гц ($\eta_s / \cos(\varphi)$)	200 Гц ($\eta_s / \cos(\varphi)$)	500 Гц ($\eta_s / \cos(\varphi)$)	1000 Гц ($\eta_s / \cos(\varphi)$)
0,2	0,63	3,15	0,651/0,075	0,671/0,042	0,678/0,027	0,682/0,02
0,4	1	2,5	0,74/0,086	0,753/0,048	0,758/0,031	0,76/0,023
1	1,842	1,842	0,769/0,099	0,778/0,054	0,781/0,036	0,782/0,026
1,4	2,305	1,647	0,782/0,105	0,788/0,058	0,791/0,038	0,792/0,027
1,5	2,414	1,609	0,781/0,106	0,788/0,058	0,79/0,038	0,791/0,027
2	2,924	1,462	0,779/0,11	0,783/0,06	0,785/0,039	0,786/0,028
2,5	3,93	1,357	0,773/0,106	0,779/0,058	0,781/0,038	0,782/0,027

Исследовано влияние параметров подложки на энергетические характеристики многофункционального плавильного агрегата и геометрию подложки. В результате проделанных исследований сделаны следующие выводы: уменьшение электропроводности подложки ведет к уменьшению активной составляющей электромагнитной мощности в подложке и как следствие незначительное изменение геометрии; увеличение уровня подложки ведет к увеличению активной составляющей электромагнитной мощности для получения требуемой высоты лунки; наличие шлака никак не влияет на активную составляющую электромагнитной мощности в подложке, но геометрия изменяется незначительно; увеличение тока в обмотке индуктора ЭМВ ведет к увеличению скорости вращения подложки и к увеличению высоты лунки.

Исследованы режимы работы МПА при проведении одной из возможных технологических реакций – переработка небалансового боксита.

На рис. 17 приведены полученные в ходе вычислительных экспериментов на созданной модели графики изменения во времени основных параметров, характеризующих работу агрегата.

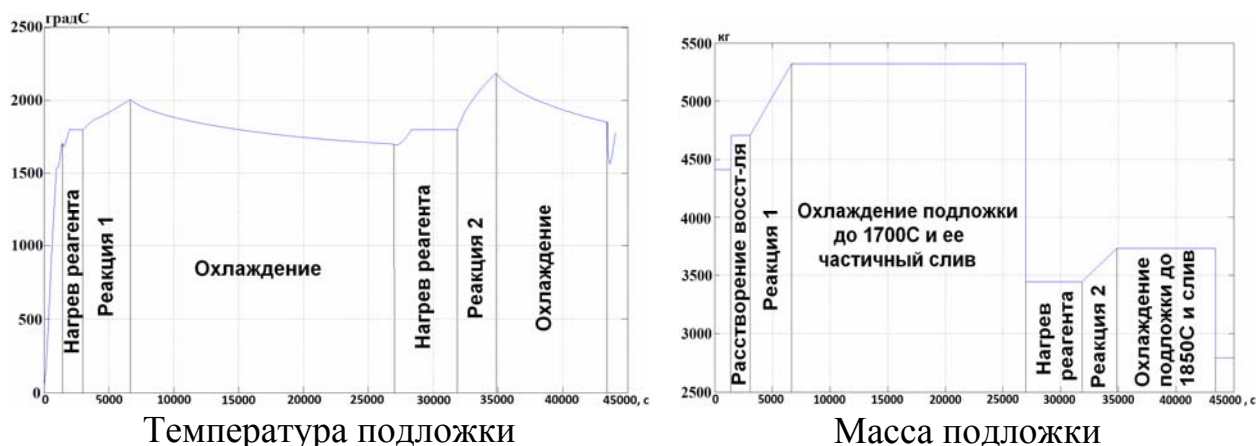


Рис. 17. Зависимости температуры (а) и массы подложки (б) от времени

Данные результаты показывают, что вышеописанный процесс переработки небалансового боксита возможно осуществить в агрегате данной конструкции. Кроме того, следует отметить несовершенство системы охлаждения, которая существенно увеличивает длительность процесса во времени.

Выполнено экспериментальное исследование работы лабораторного МПА на этапе наплавления жидкометаллической подложки. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными (рис. 20), которое показывает, что допущения, принятые при разработке моделей, приемлемы для получения достаточной для инженерной практики точности



Рис. 18. Лабораторный плавильно-литейный экспериментальный комплекс с МПА

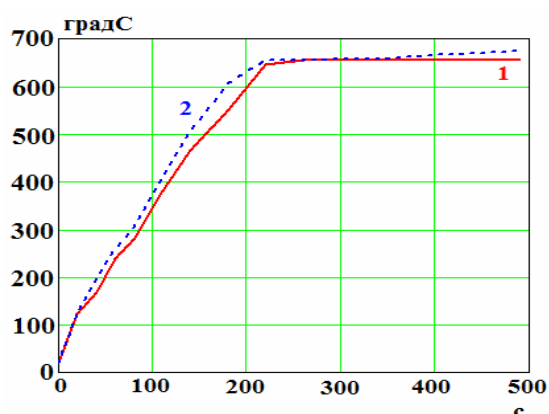


Греющий индуктор МПА

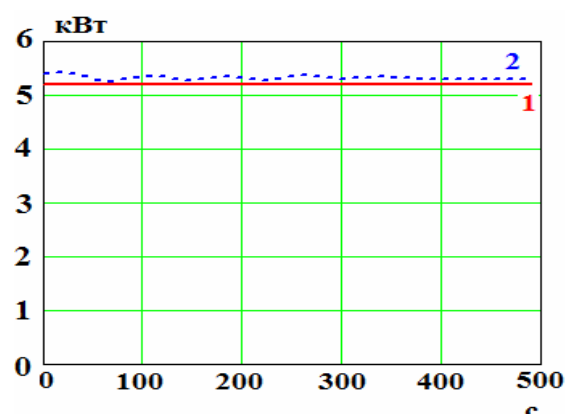


Вращающийся индуктор МПА

Рис. 19. Индуктора МПА



Температура загрузки



Мощность источника

Рис. 20 Результаты сравнения эксперимента и компьютерного моделирования
1- экспериментальные данные, 2 – результаты компьютерного моделирования

В приложениях приводятся листинг программ модели и структурные схемы моделей, результаты сравнения работы статической и динамической модели инвертора, расчет геометрии лунки, материальные балансы переработки небалансового боксита, документы о внедрении.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Выполненная диссертационная работа представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены научно-обоснованные технологические решения по созданию нового агрегата, позволяющего получать качественный продукт с меньшими денежными затратами, а также разработка конструкции данного устройства на этапе составления технического задания по созданию опытно-промышленного образца, имеющие существенное значение для металлургии страны.

Основные результаты могут быть выражены в следующем:

1. Разработана и представляется впервые математическая модель, позволяющая исследовать процессы в загрузке МПА, состоящая из следующих основных взаимосвязанных элементов (подмоделей):

- модель электромагнитных процессов для нагревательного индуктора на основе метода Т-образных схем замещения, в которой учитываются: изменение магнитной проницаемости магнитной шихты в зависимости от напряженности магнитного поля индуктора; изменение уровня загрузки в процессе плавки; изменение удельной электропроводности загрузки в зависимости от ее температуры и агрегатного состояния;

- модель источника питания для нагревательной части, позволяющая реализовать: поддержание тока на уровне не выше номинального тока инвертора и не ниже минимального тока выпрямителя; поддержание температуры основного металла на заданном уровне;

- тепловая модель, основанная на детализированных эквивалентных тепловых схемах замещения, в которой учитываются: изменение уровня и геометрии загрузки по ходу процесса плавки; изменение физических параметров загрузки и узлов агрегата (теплоемкость, теплопроводность, плотность) в зависимости от температуры; определение и затвердевание загрузки; система охлаждения нагревательного индуктора; наличие нескольких источников поступления тепловой мощности в загрузку;

- модель электромагнитных процессов на основе метода детализированных схем замещения для вращающегося индуктора;

- гидродинамическая модель, позволяющая производить расчет скорости вращения расплава и размеры лунки в ванне плавильного агрегата.

2. Создана компьютерная модель МПА, как многокомпонентного комплекса, реализованная в компьютерных программах в среде *MATLAB-Simulink*. Для управления работой МПА на всех этапах предусмотрено использование нескольких каналов воздействия: ток и частота тока индуктора ИТП; схема включения индуктора ИТП; ток и частота тока индуктора ЭМВ; довалки шихты при наплавлении подложки; подача в рабочую камеру реагента (шлака).

3. Произведена верификация электромагнитной модели нагревательной части на основе Т-образных и детализированных схем замещения с полевыми методами. Выполнено сравнение разработанной математической модели источника питания в статической постановке с его динамической моделью. Произведено сравнение результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными, которое показывает, что допущения, принятые при разработке моделей, приемлемы для получения достаточной для инженерной практики точности.

4. С помощью компьютерной модели проведены исследования разрабатываемого варианта МПА и созданной автором лабораторной модели. Подробно изучены особенности тепловых и электромагнитных процессов в загрузке, влияние параметров загрузки на характеристики МПА на этапе создания жидкометаллической подложки, влияние параметров подложки на

энергетические характеристики МПА и геометрию подложки. Выполнено исследование режимов работы МПА.

5. Даны рекомендации по формированию энергоэффективных режимов работы многофункционального плавильного агрегата, в частности, по выбору мощности источника питания, выбору масс довалок для достижения наибольшей скорости расплавления, возможные варианты реализации процесса контроля и управления мощностью экзотермических реакции восстановления оксидов. Сформулированы рекомендации к основным техническим решениям для создания опытно-промышленного образца МПА, в частности, по выбору конструкции ванны агрегата для обеспечения достаточного охлаждения, выбору размеров ванны, выбору проводника для ТЭМВ, выбору способа подогрева подложки до заданной температуры после ее расплавления.

Результаты исследований переданы ЗАО «РЭЛТЕК» и используются им при разработке и проектировании современных ПА на основе ИТП. Математические модели, программы и лабораторные модели используются в учебном процессе и научных исследованиях кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» УрФУ.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Математическое моделирование работы индукционной тигельной печи в составе многофункционального плавильного агрегата / С.М. Фаткуллин, В.Э. Фризен // Промышленная энергетика №5, Москва, 2010. С. 14-18.
 2. Одномерная динамическая модель ИТП / А.А. Идиятулин, Ф.Н. Сарапулов, С.М. Фаткуллин, В.Э. Фризен // Электротехника №5, Москва, 2010, с. 37-42.
 3. Многофункциональный плавильный агрегат для миниметаллургических предприятий / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, В.С. Третьяков, В.Э. Фризен, А.А.Идиятулин, С.М. Фаткуллин, А.Ю. Петров, В.И. Лузгин, Е.А. Коршунов, В.Л. Бастриков // «Промышленная энергетика», №5, 2010. - С.7-11.
 4. Modelowanie matematyczne procesow cieplnych w indukcyjnych przetwornikach cylindrycznych / S.M. Fatkullin, W.E. Frizen, P. Szymczak, S. Wiszniewski // VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna / Innowacyjne Materialy I Technologie w Elektrotechnice - i-MITEL 2010, Przylesko k. Gorzowa Wielkopolskiego. С. 131-139.
 5. Исследование влияния разбиения тепловой математической модели на точность полученных результатов / А.А. Идиятулин, С.М. Фаткуллин, В.Э. Фризен // Материалы региональной науч.-практ. конференции Молодежь и наука./ НТИ (ф) УГТУ-УПИ, г. Нижний Тагил, май 2010, с.256-259.
- Математическая модель источника питания ИТП / О.В. Оборотистова, С.М. Фаткуллин, В.Э. Фризен // II Всероссийская конференция “ИННОВАЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА”, НГТУ, 2010. стр. 283-287

6. Перспективные плавильные агрегаты на основе ИТП / А.А. Идиятулин, В.И. Лузгин, С.Ф. Сарапулов, Ф.Н. Сарапулов, **С.М. Фаткуллин** // VIII-я научно-практическая конференция с международным участием «Проблемы и достижения в промышленной энергетике», Екатеринбург, 2008. С.71-74.
Формирование энергоэффективных режимов работы многофункционального плавильного агрегата / А.А. Идиятулин, С.Ф. Сарапулов, **С.М. Фаткуллин**, С.В. Федонов // Сборник докладов российско-британского семинара молодых ученых и студентов «ЭКОТЕХНОЛОГИИ 21 ВЕКА: ЭКОТЕХ – XXI» Проект Британского Совета. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2007. С. 63-68.
7. Формирование энергоэффективных схем питания индукционной тигельной печи / А.А. Идиятулин, В.И. Лузгин, Ф.Н. Сарапулов, **С.М. Фаткуллин**, В.Э. Фризен // Вопросы теории и проектирования электрических машин. Моделирование электромеханических процессов: сборник научных трудов/ Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2009. С. 5-8.
8. Simulation of the Multifunctional Melting Unit / **Salavat M. Fatkullin**, Sergey F. Sarapulov, Fiodor N. Sarapulov, Aleksey A. Idiyatulin// PROCEEDINGS OF THE 3rd INTERNATIONAL FORUM ON STRATEGIC TECHNOLOGIES, IFOST – 2008. Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia) - Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia). June 23-29, 2008. - P.425-428.
9. Режимы работы многофункционального плавильного агрегата / **С.М. Фаткуллин**, В.Э. Фризен, В.С. Третьяков, Е.А. Коршунов, А.А. Идиятулин, Ф.Н. Сарапулов // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2011. Сборник научных трудов. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2011. С.158-165.

Подписано в печать _____
Офсетная печать

Формат 60 x 84 1/16
Тираж 120

Бумага писчая
Заказ №

Ризография НИЧ УрФУ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19